

## AERODINÁMICA: LA MAGIA DEL VUELO

---

Amable Liñán Martínez

La ingeniería aeronáutica, ampliada posteriormente a la aeroespacial, ha tenido un desarrollo espectacular durante el siglo XX, contribuyendo significativamente a la conversión de nuestra Tierra en la aldea global actual. El desarrollo de la ingeniería aeronáutica fué en gran medida incentivado por las aplicaciones militares de la aviación, que cambiaron drásticamente el carácter de las guerras. Las aplicaciones comerciales ligadas al transporte aéreo, iniciadas con fuerza en el segundo tercio del siglo pasado, se han convertido ahora en el motor principal del desarrollo aeronáutico, al duplicarse el tráfico aéreo cada diez o quince años. El desarrollo aeronáutico no podría haber ocurrido sin otro paralelo de las ciencias aeronáuticas que, por ello, recibieron también fuertes apoyos gubernamentales. Es verdaderamente notable que la ingeniería aeronáutica y la mecánica de fluidos moderna (una de las disciplinas centrales de las ciencias aeronáuticas) nacieran simultáneamente.

Decía Leibnitz que *"es de suma utilidad reconocer los orígenes de los descubrimientos memorables, especialmente los que no han sido encontrados fortuitamente sino como resultado de la meditación. El arte de hacer descubrimientos puede transmitirse cuando se examinan ejemplos notables de este arte"*. Permítanme por ello dedicar mis palabras, principalmente, a celebrar las aportaciones memorables de los hermanos Wright a la ingeniería aeronáutica y de Ludwig Prandtl, que murió hace ahora 52 años, después de habernos regalado durante otros cincuenta contribuciones esenciales a la mecánica de fluidos y a la aerodinámica modernas.

El 17 de diciembre de 2003 se cumplieron 100 años de los primeros vuelos de los hermanos Wright en una aeronave más pesada que el aire, propulsada por una hélice, que ellos habían diseñado, movida por un motor alternativo de combustión interna, que ellos habían diseñado y construido. La aeronave estaba provista de un sistema de estabilidad y control que ellos habían concebido. Fué el resultado de sus observacio-

nes, estudios, ensayos y trabajo intenso y meditado durante los cuatro años anteriores. Éste hecho en el poco tiempo que, en el otoño, les permitía su trabajo en el taller de venta, alquiler, reparación y fabricación de bicicletas de su propio diseño, que habían montado en Dayton, Ohio.

Habían iniciado su empeño aeronáutico con el objetivo más modesto de que ellos podrían contribuir al desarrollo de planeadores para el vuelo deportivo, dotándoles del sistema de control adecuado. El esfuerzo, que culminó con los primeros vuelos propulsados de 1903 y los vuelos posteriores de 1904 y 1905, fué hecho en solitario, y sin financiación, por los dos hermanos que, además de bien compenetrados, estaban dotados de una gran tenacidad y una asombrosa capacidad creativa e intelectual. Con su buen hacer sentaron también las bases del procedimiento a seguir para los desarrollos aeronáuticos posteriores. Es por ello que hace ahora dos años celebramos el centenario de su primer vuelo.

La mitología griega incluye el empeño de Dédalo por aprender a volar. Dédalo que trabajaba para el Rey Minos de Creta montó un taller secreto sobre uno de los acantilados de la isla, con la idea de aprovechar muchas horas de observación del vuelo de las águilas y gaviotas para diseñar unas alas impermeabilizadas con cera para conseguir volar. Cuando el Rey Milos le acusó de intentar robar el secreto del Laberinto se decidió huir volando desde Creta a Sicilia, acompañado de su hijo Ícaro, al que proporcionó alas y le enseñó a volar, advirtiéndole que no volase ni muy bajo, para no dañar las alas con la humedad del mar, ni muy alto para evitar que se derritiese la cera con el calor del sol. La euforia del vuelo llevó a Ícaro a desatender este consejo por lo que se mató cayendo sobre el sol. El padre, en cambio consiguió huir de la persecución del Rey Milos, volando hasta Sicilia.

Pero los griegos no limitaron su interés por el vuelo sólo a este mito. Ya Sócrates propuso que:

"El hombre debe ascender desde la Tierra por encima de la atmósfera pues sólo así podrá comprender el mundo en que vive". Platón señaló respecto al vuelo que "la función natural de las alas es permitir remontar a lo que es pesado al lugar donde habitan los de la raza de los dioses. Las alas comparten lo divino más que ninguna otra parte del cuerpo".



*Flyer (1903)*

Una de las aportaciones singulares de la Grecia clásica a nuestro conocimiento de las leyes de la naturaleza se debe a Arquímedes, quien describió cuantitativamente el empuje que, debido a las fuerzas gravitatorias, ejercen los líquidos sobre los cuerpos sumergidos en ellos. Este principio de Arquímedes determina la fuerza sustentadora del agua sobre los barcos y también la del aire sobre los globos que proporcionaron, desde la primera ascensión de los hermanos Mongolfier en 1783, el primer modo de navegación aérea. Sin embargo otra aportación de la filosofía griega debida a Aristóteles, significó, en cierto modo, un obstáculo a nuestro conocimiento del movimiento de los cuerpos en el aire. Aristóteles sugería que los cuerpos se mueven en el aire gracias a que, en virtud del horror al vacío de la naturaleza, son empujados por el aire que acude así a llenar el vacío que dejarían tras de sí los cuerpos en su movimiento. Fué Galileo el primero en enseñarnos lo contrario; que los cuerpos van frenando su movimiento en el aire como consecuencia de la resistencia que éste ejerce sobre los mismos.

De los dos modos posibles de sustentación en el aire el más simple es el que utilizan los aeróstatos o los dirigibles. Estos están dotados con una bolsa, en forma de globo o huso, inflada con aire caliente o hidrógeno, para, como los barcos, generar la sustentación necesaria con ayuda del principio de Arquímedes. Los vuelos en globos inflados con

aire caliente comienzan con las primeras ascensiones de los hermanos Montgolfier, en 1783. En el mismo año, Charles y los hermanos Robert iniciaron los vuelos con globos llenos de hidrógeno; Charles es el físico que *propuso en 1787 la ley de la termodinámica que lleva su nombre*.

Parece casi seguro que en España fué el ingeniero Agustín de Betancourt el primero en lanzar un globo aerostático, en noviembre de 1783. El conde de Aranda promovió durante el reinado de Carlos IV el desarrollo de las aplicaciones militares de la aerostación, que se iniciaron con éxito bajo la dirección de Proust, con la construcción de un globo que resultó ser un observatorio excelente. La aerostación militar española renace en 1884, cuando se crea, al mando del comandante Pedro Vives, el Servicio Aerostático que *incluía el Parque Aerostático de Guadalajara y la Compañía de Aerostación*. A este servicio se incorporaron posteriormente los ingenieros militares Alfredo Kindelán y Emilio Herrera, que jugarán un papel determinante en el desarrollo de la aeronáutica española. En particular, Emilio Herrera diseñó y construyó en 1921 el primer túnel aerodinámico en España (al que la NACA le dedicó uno de sus Technical Reports), donde se hicieron los primeros encargos del Autogiro de La Cierva. Fué el primer director de la Escuela Superior Aerotécnica, creada hace ahora 75 años, y ahora le honra la Fundación AENA, con el nombre del más distinguido de sus Premios.

El primer paso hacia el dirigible se dio en 1852, cuando el ingeniero francés Henri Giffard sustituyó el globo por una especie de huso para facilitar el control y la dirección de su movimiento. En 1874, el general francés Meusnier instaló un motor de vapor en la barquilla para mover una hélice y así proporcionar la propulsión. Al éxito posterior de los dirigibles contribuyeron especialmente el brasileño Santos Dumont, *con muchos vuelos en sus dirigibles*, y el conde Zeppelin, que introdujo el dirigible rígido.

La aportación española al desarrollo de los dirigibles se inicia con la presentación en la Academia de Ciencias, por el ingeniero de Caminos Leonardo Torres Quevedo, de un proyecto de dirigible semi-rígido con armadura funicular, que era fácilmente desmontable para facilitar su transporte. Para su desarrollo el gobierno aprobó, en 1904, la creación de un Centro de Ensayos de Aerostación para el estudio teórico y experimental de la navegación aérea, bajo la dirección de

Torres Quevedo. La experimentación fué llevada a cabo en el Parque Aerostático de Guadalajara, donde Torres Quevedo contó con la colaboración de Alfredo Kindelán. Las primeras pruebas del dirigible se hicieron en 1908 y su fabricación se inició por la casa ASTRA, en Francia, en 1909. Francia compró 20 de los dirigibles e Inglaterra más de 50, que jugaron un papel importante en la Primera Guerra Mundial.

El desarrollo del vuelo con aeronaves mas pesadas que el aire es más tardío. George Cayley fué el pionero, con sus investigaciones en la primera mitad del siglo XIX, en establecer los conceptos que ayudan a definir los problemas a resolver para conseguir el vuelo. Él señaló que la aeronave debe disponer de un sistema de sustentación, formado por las alas, para equilibrar el peso aprovechando la fuerza sustentadora debida a las presiones ejercidas por el aire cuando se mueve respecto al cuerpo. Para equilibrar la resistencia al movimiento hay que dotar a la aeronave de un sistema de propulsión o, en su defecto, la trayectoria debe estar inclinada hacia el suelo con el ángulo de planeo, para así compensar la resistencia con la componente del peso según la trayectoria. Además, hay que dotar a la aeronave de sistemas de estabilidad y control; con lo que la aeronave necesita alas, fuselaje y una cola.

George Cayley construyó el primer modelo de planeador en 1804 y posteriormente dos planeadores que hicieron vuelos breves con piloto a bordo. Utilizó la técnica del brazo giratorio para medir la sustentación de una placa plana cuadrada en función del ángulo de ataque. Midió también la resistencia de una placa cuando el aire incide perpendicularmente a la misma. Obtuvo para el coeficiente de resistencia el valor 1,5, frente al valor correcto 1,14. Criticó la teoría de Newton que conducía a valores de la sustentación proporcionales al cuadrado del seno del ángulo de ataque.

Las aportaciones de sir George Cayley influyeron sin duda para incentivar los intentos de desarrollar el vuelo. Así, en 1866, se creó en Inglaterra la Aeronautical Society, hoy Royal Aeronautical Society. Francis Wenham, uno de sus fundadores, construyó junto con John Browning el primer túnel aerodinámico. Tenía una sección cuadrada de 46 cm de lado, con la corriente proporcionada por un ventilador movido por un motor de vapor. Observaron que los valores más altos de la relación  $L/D$ , entre la sustentación y la resistencia de placas, correspon-

dían a valores pequeños del ángulo de ataque. Diez años más tarde Horatio Phillips construyó, también por encargo de la Aeronautical Society, un segundo túnel en el que la corriente resultaba de la aspiración del aire, aguas abajo de la sección de ensayo, mediante un eyector.

Sin embargo, una muestra de las dudas de los científicos respecto a las posibilidades del vuelo, consecuencia del conocimiento todavía muy deficiente de la aerodinámica, está en las palabras que escribió lord Kelvin cuando declinó la invitación a formar parte de la Aeronautical Society: *"Yo no tengo ni un ápice de fe en ninguna otra forma de navegación aérea que no sea mediante globos, ni ninguna esperanza en los buenos resultados de los intentos de los que oímos"*.

En la mayor parte de estos intentos se trataba de emular con alas batientes el vuelo de los pájaros. Los intentos más exitosos fueron los del ingeniero mecánico alemán Otto Lilienthal, que diseñó y construyó hasta 16 tipos distintos de veleros. Para la sustentación utilizaba alas con perfiles en forma de arco de círculo, que había ensayado mediante el sistema del brazo giratorio. Él mismo realizaba los vuelos, colgándose del armazón y moviendo su cuerpo para conseguir la estabilidad y el control. El planeador era lo que hoy se llama planeador de suspensión o *hang-glider*; o también con el nombre equívoco de ala delta. En 1896 se mató por entrada en pérdida de su planeador, después de haber hecho más de 2.000 vuelos en los 5 años anteriores, en los que acumuló un total de 5 horas de vuelo. Escribió muchos artículos, así como un libro, aparecido en 1894, con el título "El vuelo de los pájaros como fundamento del arte de volar", donde difundía los resultados de sus medidas y experiencias.

Octave Chanute, un ingeniero americano nacido en Francia, que fué presidente de la Asociación Americana de Ingenieros Civiles, diseñó un planeador biplano con una estructura tipo Pratt, que después adoptaron los hermanos Wright. En los vuelos iniciados en 1896 su colaborador Augustus Herring actuó como piloto, colgándose como Lilienthal del plano inferior. Octave Chanute contribuyó como pocos a la atracción por el vuelo, y a la difusión de los conocimientos sobre el vuelo con artículos y conferencias y con un libro, publicado en 1896 con el título "Progress in Flight Machines", donde se recogía toda la información disponible sobre el tema.

Otro grupo de entusiastas del vuelo se ocupó del problema de la propulsión. Entre ellos el francés Alphonse Pénaud, paralítico desde su niñez, que diseñó y construyó aeromodelos de planeadores dotados de estabilizador de cola para la guiñada y el cabeceo. Para la estabilidad de balanceo las alas tenían un diedro positivo; que no utilizarían los hermanos Wright porque dificultaba el control de balanceo. La propulsión se conseguía con hélices movidas con cintas de caucho retorcidas. Un modelo de helicóptero diseñado por Pénaud fué regalado por el padre de los hermanos Wright, obispo protestante, a sus hijos, cuando estos tenían 7 y 11 años. Sin duda ésto sirvió para incentivar su afición al vuelo. Aprendieron pronto a repararlo y a construir otros nuevos; aunque, descubrieron para su sorpresa, que no les era posible aumentar su tamaño manteniendo su capacidad de vuelo.

Samuel P. Langley, famoso astrónomo americano, secretario de la *Smithsonian Institution*, también dedicó un considerable esfuerzo al desarrollo del vuelo propulsado. Empezó haciendo experimentos con un brazo giratorio de 9 metros de radio, contribuyendo con sus medidas a la determinación de las fuerzas aerodinámicas sobre los perfiles que utilizó en sus planeadores. En 1896 consiguió hacer volar 1.200 metros un aeromodelo propulsado por una hélice movida con un motor de vapor; lo que le animó a intentar dar el salto al vuelo propulsado con un piloto a bordo. Para este proyecto recibió el apoyo del Departamento de Guerra americano con un contrato de 50.000 dólares; a los que añadió otros 23.000 aportados por la *Smithsonian Institution*.

Langley puso el énfasis más en el motor que en el control o la estructura. Contrató a Charles Manly, un recién graduado en ingeniería en Cornell, que le ayudó con el desarrollo de un excelente motor de 52 CV para la propulsión. Charles Manly hizo dos intentos de vuelo, en octubre y diciembre de 1903, desde una plataforma sobre el río Potomac. Ambos intentos resultaron fallidos, por lo que se canceló el proyecto. Parte del problema pudo estar en las deformaciones excesivas que las cargas aerodinámicas inducían en la estructura, que conducirían a un defectuoso comportamiento aerodinámico. Sólo nueve días después del segundo intento de Manley, ya hizo Orville Wright el primer vuelo propulsado.

Aunque la educación formal de los hermanos Wright terminó con la enseñanza secundaria, estaban dotados de una curiosidad intelectual

excepcional. Eran lectores asiduos de la biblioteca pública de Dayton y de la Enciclopedia Británica, que tenían en casa, especialmente de sus artículos científicos. El menor, que tenía un gran ingenio y habilidad mecánica, había trabajado dos años, durante las vacaciones veraniegas de su enseñanza secundaria, en una imprenta, y allí concibió un muy novedoso tipo de prensa, que construyeron entre los dos hermanos. Fué la base para una imprenta que montaron y que fué su fuente de ingresos durante el periodo 1890-1896. En ella imprimían los anuncios de actos sociales y propaganda de negocios de Dayton; pero además, imprimían una especie de periódico local con noticias y curiosidades, que redactaba Wilbur Wright, excelentemente dotado para la escritura.

Fué durante ese período cuando se sumaron, quizás los primeros en Dayton, a la fiebre deportiva que había llegado con la bicicleta. Por la habilidad mecánica de ambos, pronto se encontraron reparando las bicicletas de muchos de sus amigos; ésto les animó a abrir un taller de bicicletas en 1893. Para disponer de la potencia necesaria para mover el torno y otras herramientas, Orville diseñó y construyó un motor de gas de 2 CV, que posteriormente utilizarían para mover el ventilador de su túnel aerodinámico.

Los hermanos Wright estaban muy impresionados por los intentos de vuelo de Otto Lilienthal. La muerte de éste en 1896 les motivó aún más a participar en el empeño del vuelo con planeador, que a ellos les parecía un deporte muy atractivo. La decisión de participación activa la tomaron en 1899, y en mayo escribieron a la Smithsonian Institution para que les mandasen información sobre la literatura existente acerca del vuelo. Recibieron una serie de folletos, entre ellos dos de Langley, y una lista de libros cuya lectura les recomendaban. Ésta incluía los libros de Lilienthal y Octave Chanute, y, también, los Aeronautical Almanac de 1895, 1896 y 1897, publicados por James Means, que recogían toda la información conocida sobre el vuelo hasta ese momento.

En el otoño de 1899 iniciaron la tarea de construir un modelo de planeador de metro y medio de envergadura, que volaron como cometa en Dayton para poner a prueba las ideas que desarrollarían en los tres años posteriores. Los resultados de sus ensayos del aeromodelo fueron satisfactorios y por ello decidieron construir un planeador para iniciar su experiencia directa del vuelo.



Las contribuciones esenciales de los hermanos Wright pueden resumirse en tres líneas. La primera y más trascendental fué reconocer que el problema principal del vuelo era el control; lo demás era secundario para ellos. Su experiencia con la bicicleta, que es un vehículo inestable, les hizo perder el miedo a la exigencia de estabilidad de la aeronave para, en cambio, poner toda su atención en el control. Pensaban que era



*Los Hermanos Wright*

imprescindible dotar al planeador de sistemas de control móviles basados en las fuerzas aerodinámicas, abandonando los empeños anteriores de buscar el control con el desplazamiento del cuerpo del piloto, como en la cuerda floja. Este sistema era a su juicio claramente inviable cuando el planeador, que debía desembocar en el avión futuro, tuviese un tamaño y un peso grandes frente a los del piloto.

Segundo, eligieron una estructura de líneas simples, casi rectas, en la que los dos planos sustentadores estaban definidos por dos largueros, próximos a los bordes de ataque y de salida, unidos por costillas; forrado todo con tela. Los largueros estaban unidos por unos montantes verticales para formar una estructura robusta, tipo Pratt, como la del planeador Chanute-Herring.

Para facilitar el aterrizaje, el plano inferior se apoyaba en un patín, formado por dos barras metálicas que se prolongaban curvándose hacia arriba delante del avión. En la parte delantera de este patín se adosaba un estabilizador móvil, que actuaba de timón de profundidad

para el control de cabeceo; éste timón cuando está delante del avión se dice de tipo *canard*. El control de balanceo, necesario para inclinar el avión, como la bicicleta, cuando éste debe cambiar de dirección, se conseguía torsionando o alabeando los extremos de las alas en sentidos opuestos; para aumentar el ángulo de ataque y con ello la sustentación de un extremo y disminuir la del otro, tal como se hace hoy con los alerones. El primer modelo y los dos primeros planeadores no disponían todavía de timón de dirección, pensando que los cambios en la dirección (guiñada) los conseguirían con el alabeo. En resumen, buscaron una solución estructural bien integrada con el control; cuya consistencia aseguraban con ensayos colgando el avión de las puntas de las alas y cargándolo con pesos hasta cinco veces superiores al del piloto. Al igual que ocurre con algunos aviones de caza actuales, la aeronave de los hermanos Wright era inherentemente inestable, pero su estabilidad en vuelo se aseguraba mediante el control por el piloto. Éste volaría tumbado sobre el plano inferior para disminuir la resistencia y facilitar el control.

Por último, reconocieron la necesidad de establecer un sistema de ensayos en vuelo que les proporcionase los conocimientos necesarios de las actuaciones y les sugiriesen las modificaciones necesarias. Wilbur afirmaba que la experiencia directa del vuelo era imprescindible y ponía como ejemplo que la única manera de domar un potro era lanzándose al empuje y no esperar sentado a observar las cabriolas que hacía. Wilbur y Orville Wright fueron también los primeros pilotos de pruebas.

Wilbur tenía 32 años cuando en mayo de 1900 decidió escribir a Octave Chanute para pedirle consejos acerca de la viabilidad de su plan de acción. La carta empezaba diciendo:

"Durante los últimos años he estado afligido por la creencia de que el hombre puede volar. Mi enfermedad ha aumentado en severidad y siento que pronto me costará una cantidad creciente de dinero e incluso la vida. He estado tratando de organizar mis negocios de tal modo que pueda dedicar todo mi tiempo durante unos meses a la experimentación en este campo".

Chanute le animó y le dió consejos respecto al tipo de madera y su tratamiento, a los barnices, y al lugar de ensayos. Octave Chanute se hizo pronto un entusiasta defensor de los proyectos de los hermanos Wright, y un excelente embajador para la difusión de sus ideas y resultados.

A mediados de agosto de 1900 empezaron a construir el planeador, con la configuración que he descrito, siguiendo la ya ensayada del modelo de 1899. Tenía una envergadura (distancia entre las puntas del ala) de cinco metros y medio, y un alargamiento (relación entre la envergadura y el valor medio de la cuerda) de 3,6. El peso sin piloto era de 24 Kg., al que habría que añadir 63 Kg. del piloto. Los largueros eran de pino blanco y las costillas de fresno.

Después de consultar al Servicio Meteorológico, se decidieron por Kitty Hawk (Carolina del Norte) como emplazamiento para sus experimentos, pues allí anunciaban vientos medios en torno a los 30 Km/hora y había tres grandes colinas de arena con pendientes de unos 7 grados, que les facilitarían el vuelo con el planeador.

Los hermanos Wright solo disponían de unos dos meses en el otoño, libres del trabajo continuo de su taller de bicicletas, para hacer los experimentos. Los iniciaron la segunda semana de octubre de 1900, volando el planeador como cometa, con distintas cargas; midiendo en vuelo las sustentación y resistencia y la respuesta a su sistema de control. También hicieron los primeros vuelos con el planeador sujeto como cometa, con Wilbur montado y actuando sobre los mandos; así adquiría la experiencia que, con poco peligro, le facilitase el vuelo libre como planeador.

Estaba claro que había algo incorrecto en los datos que habían manejado sobre la sustentación y la resistencia de los perfiles, porque el ángulo de planeo era muy superior a los 3 grados que esperaban. La sustentación eran menor que la esperada y necesitaban vientos muy fuertes para poder hacer volar a la nave como planeador. Por ello sólo consiguieron un total de dos minutos de experiencia. En sus primeros vuelos, de 15 a 20 segundos de duración, fijaban el sistema de control de balanceo y sólo movían el timón horizontal, hasta conseguir familiarizarse con el control de cabeceo.

Cuando intentaron el control de balanceo con el alabeo de las alas, encontraron grandes dificultades. Tardaron en darse cuenta de que el planeador resbalaba, o derrapaba, hacia el lado en que el ala tenía el

ángulo de ataque menor. El 23 de octubre tuvieron que interrumpir los experimentos sin tener la solución al problema.

A finales de julio de 1901 regresaron a Kitty Hawk con un nuevo planeador que pesaba casi el doble que el anterior, con una envergadura de seis metros y medio y una superficie alar total de  $26 \text{ m}^2$ , frente a los  $15 \text{ m}^2$  del planeador anterior. Resultó ser menos controlable al cabeceo que el anterior. Decidieron reducir "in situ" la curvatura de los perfiles para evitar el fuerte desplazamiento del centro de presión y mejorar el control longitudinal. Así consiguieron vuelos de veinte segundos y unos cien metros, mucho más largos que los de los experimentadores previos; sin embargo, el control lateral unas veces era muy efectivo y otras muy poco. Además, las actuaciones del planeador no correspondían a las que se deducían de los datos conocidos sobre la resistencia y la sustentación. Estaban poco satisfechos con los valores bajos obtenidos de la relación sustentación/resistencia, y con grandes dudas respecto a la pronta llegada del vuelo propulsado.

A petición de Octave Chanute, Wilbur Wright dió en Chicago, en 1901, una conferencia sobre sus experimentos de vuelo en la reunión de septiembre de la Sección Oeste de la Sociedad Americana de Ingenieros. En ella anunció discrepancias entre los datos conocidos sobre la resistencia y sustentación de perfiles y las actuaciones obtenidas, por lo que dudaban de la fiabilidad de los datos. Para aclarar el origen de las discrepancias, empezaron realizando experimentos rudimentarios para comparar las fuerzas sobre distintos perfiles, a distintos ángulos de ataque, con la fuerza sobre una placa plana normal a la corriente. Adosaban la placa y el perfil al borde de una rueda móvil de eje vertical, que fijaban en la parte delantera de una bicicleta; pedaleaban fuertemente para avanzar con la bicicleta a velocidades altas respecto al aire; y cambiaban el ángulo de ataque del perfil a analizar hasta equilibrar las fuerzas sobre la placa y el perfil, en cuyo momento la rueda dejaba de girar.

Durante el otoño de 1901 construyeron un túnel aerodinámico, el segundo de Estados Unidos, de sección de ensayos cuadrada con 40 cm de lado. La corriente, de unos 10 m/seg, se producía con un ventilador movido por el motor de 2CV que tenían en el taller. Las irregularidades de la corriente y su movimiento de giro se eliminaban haciéndola pasar

por un panel de nido de abeja. Dotaron al túnel de un sistema de balanzas que les permitía hacer medidas comparativas de la sustentación y la resistencia de perfiles o alas a distintos ángulos de ataque.

Ensayaron hasta 200 tipos distintos de perfiles y configuraciones. De ellas seleccionaron 38, que caracterizaron midiendo a intervalos de ángulo de ataque de dos grados y medio. Descubrieron, entre otras cosas, que la relación sustentación/resistencia crecía al aumentar el alargamiento, como demostraría posteriormente Prandtl. Descubrieron también que era una falacia la creencia en las ventajas de tener un borde de ataque afilado y de las grandes curvaturas de los perfiles.

En poquísimo tiempo adquirieron una información valiosísima que utilizaron con éxito para el diseño del planeador del 1902 y del Flyer, con el que harían el primer vuelo propulsado. Los hermanos Wright mandaron a Octave Chanute algunos ejemplos de las tablas de fuerzas aerodinámicas medidas, y éste los hizo llegar enseguida a la Aeronautical Society inglesa y al Aero Club de Francia, que, a través de Chanute, ya tenían conocimiento de los ensayos en vuelo de los hermanos y de las novedades de su sistema de control.

Cuando el mayor Badem-Powell, que era el presidente de la Aeronautical Society inglesa, dió el discurso presidencial en la reunión de diciembre de 1902, para hablar de los progresos recientes en el mundo aeronáutico dijo:

*"...En América Wilbur Wright y su hermano han estado consiguiendo maravillosos avances con sus máquinas planeadoras y el Profesor Langley ha estado trabajando intensamente en la construcción de una máquina grande..... lo que podemos vislumbrar en el futuro es la introducción de una nueva invención que se convertirá en una valiosísima y poderosa arma de guerra, una ayuda muy importante para la ciencia y para el conocimiento de nuestro globo, un modo rápido, económico y agradable de ir de un lugar a otro, que revolucionará completamente nuestra manera de viajar..."*

El planeador de 1902 no tenía mayor superficie alar que el anterior, pero sí mayor envergadura: 9,6 metros, con un alargamiento casi el doble que el del planeador anterior. Añadieron una cola formada por dos pla-

nos verticales para evitar el problema del derrape, o de lo que hoy llamamos "arrastre de alerón", que antes habían encontrado en los giros. Cuando en septiembre de 1902 reanudaron los ensayos en Kitty Hawk, se enfrentaron a veces con la barrera espiral; decidieron cambiar los dos planos verticales por un timón vertical único, cuyo mando de giro estaba acoplado con el de alabeo. Los resultados de los ensayos fueron muy satisfactorios, el ángulo de planeo se redujo a 5 grados, correspondiente a una relación  $L/D=10$ , entre la sustentación y la resistencia. Hicieron vuelos de casi 200 metros, con vientos de hasta 58 Km/hora, sin perder el control. Las actuaciones del planeador concordaban bien con las predicciones basadas en los resultados de sus ensayos en el túnel, que les proporcionaron una herramienta muy útil para sus desarrollos posteriores.

Los resultados de 1902 fueron tan satisfactorios, con un valor tan bajo de la tracción necesaria para compensar la resistencia, que a su vuelta decidieron dedicarse plenamente al empeño del vuelo propulsado. De manera que contrataron a Charles Taylor, un mecánico excepcional asentado en Dayton, que previamente había hecho trabajos para ellos, para que se encargase del funcionamiento del taller de bicicletas.

Se ocuparon entonces del problema de la propulsión, para lo que necesitaban diseñar una hélice que les proporcionase el empuje necesario para vencer la resistencia que sabían calcular. Se encontraron con que no existía un método predictivo para el diseño de las hélices; pero pronto comprendieron que podían suponer que la hélice se comportaría como un ala que sigue una trayectoria espiral. Así podían evaluar la tracción y también el par, a vencer con el motor, asociados a la sustentación y resistencia de cada elemento de pala. Se decidieron por una configuración con dos hélices bipalas, en movimiento contrarrotatorio transmitido desde el eje del cigüeñal del motor por dos cadenas de bicicletas.

En cuanto al motor, descubrieron que no existían fabricantes dispuestos a construirles un motor con la pequeña relación, peso/potencia, que ellos necesitaban. Por ello se decidieron, con la ayuda inestimable de Charles Taylor, a diseñarlo y construirlo ellos mismos; lo que hicieron en seis meses. El motor de gasolina, de 80 Kg de peso y refrigerado por aire, empezó proporcionando, a 1.000 rpm, 12 CV de potencia, que aumentó posteriormente hasta 16 CV. Cuando finalmente probaron el motor con

las hélices, encontraron que éstas, girando a 300 rpm, tenían un rendimiento del 60 %, superior al que ellos habían previsto.

El avión no difería mucho en concepción del planeador biplano de 1902, pero habían reforzado la estructura, que ensayaban colgándolo de las puntas de las alas y cargándola con pesos varias veces superiores al que debía soportar. El motor lo situaron a un lado del piloto y las hélices detrás. El peso total del avión incluyendo motor y piloto resultó ser de 340 Kg, que estarían sustentados por una superficie alar de 45 m<sup>2</sup>, con 12 m de envergadura.

Cuando, a finales de Septiembre de 1903, llegaron a Kitty Hawk se encontraron con un período de mal tiempo y vientos muy fuertes con ráfagas. Aprovecharon para hacer ensayos con el planeador de 1902, medir la eficiencia de la transmisión con las cadenas de bicicleta, que, después de algunos refinamientos, resultó ser excelente. También montaron los primeros instrumentos de navegación, entre ellos, un tacómetro, un anemómetro y una cuerda que pendía del timón de profundidad, con el objeto de detectar la deriva, ya que ésta podía conducir a la barrera espiral si no se controlaba a tiempo.

El 13 de diciembre, a las 10:35, el Flyer I, después de arrancar el motor, avanzó por el carril de madera de 18 m de largo que facilitaba el despegue, lo que hizo con Orville a los mandos (porque le había correspondido la suerte) y Wilbur corriendo al lado. Tenía un viento de frente de 33 Km/h. Voló horizontalmente durante 12 segundos, unos 60 metros, y aterrizó.

Después volaron alternativamente los dos hermanos otras tres veces. El último vuelo, con Wilbur de piloto, duró cincuenta y nueve segundos y recorrió una distancia de algo más de 250 metros, con un viento opuesto de 32 Km/h, a una velocidad de unos 50 Km/h respecto al aire. Cuando estaban comentando las incidencias del vuelo, una fuerte ráfaga sacudió al Flyer, produciendo destrozos que no intentaron reparar por falta de tiempo disponible antes de la Navidad.

Orville escribió el siguiente telegrama a su padre: *"Éxito en la mañana del jueves, con cuatro vuelos contra un viento de treinta y tres kilómetros por hora, volando en horizontal con una velocidad respecto al viento de cincuenta kilómetros por hora, el más largo de 59 segundos; informa a la prensa. En Navidades en casa".*

Sólo cinco periódicos dieron la noticia, relegada a páginas interiores y deformada por la imaginación de los periodistas; lo que no preocupó a los hermanos Wright. No habían invertido más de 2.000 dólares, incluyendo los costes de su trabajo y los de material y gastos de viaje, en la hazaña; cuyos resultados a ojos del vulgo podían parecer modestísimos. Ellos sabían, como nosotros hoy, que ya habían dado los pasos esenciales para el vuelo humano. Ahora quedaba desarrollar el avión para convertirlo en un vehículo práctico.

Los vuelos posteriores, en 1904 y 1905, ya los realizaron en Dayton. Cuando no había viento suficientemente fuerte, ayudaban al despegue con una catapulta. Mejoraron la estructura y las prestaciones del motor. El tiempo total de vuelo de 1904 fué sólo de 45 minutos, pero la experiencia adquirida fué inestimable, al igual que la del año 1905, cuando ya hacían vuelos de hasta 38 Km, y casi 40 minutos de duración.

Interrumpieron los vuelos durante dos años y medio porque pensaban que atraían demasiado la atención y tenían miedo de que peligrosasen sus patentes. Sin haber dejado de trabajar intensamente en sus aviones, reanudaron los vuelos en 1908, con Wilbur en Francia, ante multitud de espectadores, y Orville en Estados Unidos, ante autoridades militares americanas. Entonces el piloto ya iba sentado y podían subir a otro pasajero, con doble mando para su instrucción como piloto si era necesario. La duración de los vuelos, perfectamente controlados, sobrepasaba sin problemas la hora, y los cien kilómetros de recorrido. Con estos vuelos de demostración, que produjeron un extraordinario impacto mundial, la aviación se vistió de largo.

De la meticulosidad con que preparaban sus vuelos es testimonio el que no tuvieran más accidente grave que una entrada en barrena de Orville, en 1908, cuando llevaba como pasajero a un teniente del ejército americano. Éste se mató y Orville estuvo mes y medio en un hospital. Wilbur murió en 1912 de unas fiebres tifoideas; su hermano le sobrevivió hasta 1948.

La evolución posterior de la aviación fué vertiginosa, pero la ingeniería aeronáutica se deriva de las enseñanzas que nos ofrecieron los hermanos Wright. Incluyendo entre ellas sus procedimientos de concepción integrada



de la estructura, de la aerodinámica, de la propulsión y del control; y también en cuanto al diseño, ensayos en túnel, fabricación, y ensayos en vuelo.

¿Qué papel juegan las ciencias aeronáuticas en el desarrollo posterior de la aviación?. Mucho. Sin estas ciencias es difícil comprender cómo se pudo pasar del Flyer a los aviones actuales. Empezaré citándoles las palabras con que Orville Wright explicaba el nacimiento de la preocupación de los hermanos Wright por las ciencias aeronáuticas.

*"Los resultados de los vuelos de 1901, aunque mejores que los de nuestros predecesores, fueron decepcionantes. Veíamos que las actuaciones no respondían a los cálculos que hacíamos. Buscábamos ciegamente explorando las muchas causas que explicasen la discrepancia entre los resultados y nuestras predicciones basadas en los datos científicos existentes sobre las fuerzas aerodinámicas sobre placas a distintos ángulos de ataque, que nosotros habíamos aceptado con fe absoluta. Finalmente después de dos años de experimentación, decidimos no fiarnos de los datos existentes y tratar de obtenerlos por nuestra cuenta, teniendo en cuenta que en aquel momento lo verdadero y lo falso estaban tan íntimamente mezclados que eran indistinguibles.*

*Para el diseño inteligente es necesario conocer los efectos de los cambios que se incorporan a las máquinas voladoras. Las fuerzas sobre placas cuadradas son diferentes de las fuerzas sobre círculos, triángulos o elipses. El comportamiento de las superficies curvas es diferente del de las planas y depende de la flecha; y lo mismo ocurre con las formas parabólicas y en arco de círculo. Los perfiles gruesos difieren de los delgados dependiendo también de la posición del máximo espesor y del ángulo de incidencia de la corriente. De manera que hay miles de combinaciones en algo tan simple como un ala.*

*Habíamos tomado la aeronáutica como un deporte y nos costó trabajo embarcarnos en sus aspectos científicos. Sin embargo pronto descubrimos que este trabajo era tan fascinante que nos sumergimos en él cada vez mas profundamente. Tratando de evitar los*

*errores cometidos por otros, construimos un túnel aerodinámico donde probamos más de doscientas configuraciones a distintos ángulos de ataque".*

En 1943 Fred Kelly le preguntó a Orville Wright ¿Cuál era la contribución de los Wright que consideraba más importante para conseguir volar: el control de balance mediante los cambios de ángulo de ataque de las alas, o los experimentos en túnel para evaluar las fuerzas aerodinámicas?.

La respuesta fué: *"Bastaba que la máquina proporcionase la sustentación adecuada para que pudiese remontar el vuelo en aire en calma; aunque sin el sistema de control éste no tendría ninguna utilidad. Sin la información que nos proporcionaron los experimentos en túnel de 1901 nunca hubiésemos encontrado la forma de las alas que pudiesen sustentar la máquina con el piloto, teniendo en cuenta la potencia motriz disponible entonces. De manera que, respondiendo a su pregunta, para el primer vuelo el sistema de control fué menos importante que el conocimiento sobre la forma conveniente de las alas".*

Respondiendo a la pregunta: ¿A la vista de que el avión puede ser un instrumento de destrucción y muerte ha pensado en no haberlo inventado?. *"No, no estoy arrepentido a pesar de que nadie lamenta más que yo la destrucción que ha causado. Siento respecto al avión lo mismo que respecto al fuego; porque a pesar de que lamento los daños terribles que éste ha causado, gracias al descubrimiento por uno de nuestros antepasados de cómo iniciar los fuegos y mantenerlos, la raza humana ha encontrado miles de usos importantes del fuego".*

Me propongo ahora informarles someramente sobre el estado del arte y de los conocimientos que, a finales del siglo XIX, podrían haber facilitado el vuelo con vehículos más pesados que el aire. Debo empezar advirtiéndoles que la mayor parte de los desarrollos tecnológicos anteriores al siglo XX tuvieron lugar de un modo empírico, sin el apoyo de una investigación básica o experimental de carácter científico.

Fué Galileo el primero en advertir que los cuerpos van frenando su movimiento en el aire como consecuencia de la resistencia que éste ejerce sobre los mismos. Para calcular esta resistencia, Newton consideró que el aire está formado por partículas, que en su movimiento

relativo al cuerpo sólo ven perturbada su trayectoria al colisionar con el cuerpo; entonces perdían la componente normal de su velocidad, reteniendo la tangencial. Así pudo obtener una fórmula para determinar las componentes de la fuerza ejercida por el aire sobre el cuerpo. Éstas son, la resistencia, en la dirección del movimiento, y la sustentación en dirección normal. Las fuerzas son proporcionales al área en planta del cuerpo, a la densidad del aire y al cuadrado de la velocidad relativa, incluyendo sendos coeficientes adimensionales dependientes de la forma del cuerpo y del ángulo de ataque o incidencia. Para una placa plana, el coeficiente para la sustentación varía con el cuadrado del seno del ángulo de ataque, y para la resistencia con el cubo. A este resultado se le atribuye una influencia negativa para el desarrollo posterior del vuelo. Sin embargo, la teoría que describe el movimiento del aire alrededor de cuerpos en vuelo hipersónico recibe el apellido de Newtoniana porque responde aproximadamente a los supuestos que hizo Newton para desarrollar su método de cálculo.

A mediados del siglo XVIII se llegó al consenso de que los fluidos, el agua y el aire entre ellos, se comportaban como medios continuos; de manera que en el movimiento relativo a los cuerpos cada una de sus partículas seguía trayectorias curvilíneas que se adaptaban a la forma del cuerpo. D'Alembert se ocupó de la determinación de las fuerzas que el fluido ejercía sobre el cuerpo, haciendo la hipótesis implícita de que el movimiento era irrotacional; llegó a la conclusión sorprendente, que él calificó como paradójica, de que la resistencia era nula.

Nuestro conocimiento de cómo se mueven los fluidos cambió de un modo fundamental cuando Euler, en 1755, estableció las ecuaciones, no lineales, en derivadas parciales, que describen el movimiento; después de hacer la hipótesis de que las fuerzas ejercidas por unas partes del fluido sobre otras se reducen a la presión. Con esta hipótesis se despreciaban las fuerzas viscosas, de tipo tangencial, que en verdad son muy pequeñas en la mayor parte del campo fluido en muchísimos de los flujos que nos encontramos en la ingeniería aeronáutica.

Las ecuaciones que describen el movimiento de los fluidos en régimen continuo, incluyendo los efectos de las fuerzas viscosas, son las ecuaciones de Navier-Stokes. Fueron escritas en primer lugar por Navier, en 1823, que las dedujo mediante consideraciones difíciles de sostener sobre la

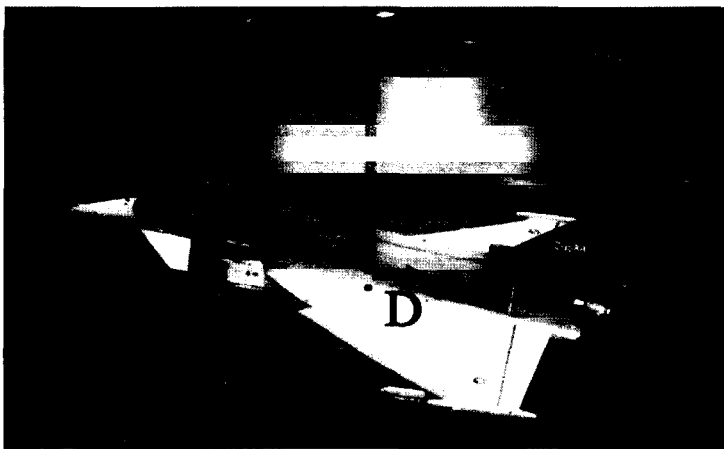
estructura de los fluidos. George Stokes, que ocupó en Cambridge durante muchos años la cátedra de Newton, estableció de forma definitiva, en 1845, las leyes del movimiento de los fluidos apoyándose en la descripción tensorial de Cauchy de los esfuerzos en los medios continuos. Cuando murió, hace 100 años, nos dejó como herencia no sólo sus ecuaciones sino muchas otras aportaciones, entre ellas el descubrimiento de la fluorescencia. Ésta proporciona hoy, con ayuda de los láseres, uno de los procedimientos más eficaces de visualización de los flujos de los fluidos y medición de concentraciones de especies reactivas.

El sistema de ecuaciones de Navier-Stokes parecía en el siglo XIX demasiado complejo como para intentar deducir de ellas, con carácter general, conclusiones para la solución de los problemas de la ingeniería; salvo en aquellos casos como los de los problemas de tipo acústico, en que las fuerzas viscosas son despreciables. Éste parecía ser también el caso de los movimientos de cuerpos no microscópicos en el agua o en el aire, por lo que se intentó describir tales movimientos sin considerar las fuerzas viscosas.

El mismo Stokes describió en 1843 el movimiento irrotacional no viscoso alrededor de una esfera, encontrando, como D'Alembert pero ya de un modo más riguroso, que si el movimiento es estacionario la resistencia es nula. Pronto se supo que no hay resistencia ni tampoco sustentación en los movimientos estacionarios irrotacionales alrededor de cuerpos de dimensiones finitas. Sólo cuando, en 1868, Helmholtz introdujo las capas de torbellinos en el estudio de los movimientos de los fluidos no viscosos se abrió una puerta para reconciliar la realidad con la teoría. Kirchhoff y Rayleigh usaron estas capas de torbellinos en la descripción del movimiento de fluidos alrededor de una placa, mostrando que los torbellinos son responsables de la estela que queda tras la placa. Con ello pudieron calcular los valores de la resistencia y de la sustentación, pero los resultados no concordaban con las medidas experimentales, aunque tampoco éstas resultaron ser muy fiables. La extensión de este análisis al movimiento alrededor de cuerpos con superficies no angulosas se debe a Levi-Civita en 1901.

Podemos atribuir la iniciación de las observaciones experimentales a Benjamín Robbins, quien, para la determinación de las fuerzas del aire sobre proyectiles, introdujo el péndulo balístico, en 1742, y el brazo

giratorio, en 1747. Encontró que, como había predicho Newton, la resistencia crece con el cuadrado de la velocidad; salvo que encontró también un crecimiento anormal de la resistencia cuando la velocidad se acerca a la del sonido. La observación del flujo supersónico alrededor de cuerpos se inicia en 1887, cuando Ernest Mach fotografió, usando estrioscopia para la visualización, las ondas de choque que aparecen en el flujo supersónico alrededor de una bala, y que ya habían sido descubiertas por Riemann en 1858.



*Sustentación y resistencia*

Ya vimos antes que los análisis teóricos del movimiento del aire no pudieron ayudar a los hermanos Wright, quienes tampoco pudieron usar con fiabilidad los resultados de las medidas experimentales existentes. La causa de este vacío experimental se debe en buena medida a la falta de una descripción teórica adecuada de los flujos de interés aeronáuticos, imprescindible para iluminar y guiar los métodos y técnicas experimentales.

En el campo específico de las ciencias aeronáuticas la situación empezó a cambiar en 1902, un año antes del vuelo de los Wright, con la presentación en Munich de la tesis doctoral del matemático Wilhem Kutta, el del método de Runge-Kutta, que se había interesado por los vuelos con planeadores, y se planteó cómo calcular el movimiento

alrededor de un perfil en forma de arco de círculo, como eran los perfiles usados por Lilienthal. Descubrió que la solución correspondiente al movimiento irrotacional no era única salvo si se especificaba el valor de la circulación de la velocidad alrededor del perfil, y que la sustentación era proporcional a esta circulación, con el factor de proporcionalidad igual al producto de la densidad del aire por la velocidad de la corriente relativa al perfil. Este resultado fué obtenido poco después, independientemente, por el profesor Joukowski en la Universidad de Moscú. También él estaba interesado por el vuelo, de tal manera que llegó a comprar un planeador a Lilienthal.

Kutta introdujo la hipótesis, que fué pronto justificada por Prandtl, de que el valor de la circulación podía determinarse, para perfiles con borde de salida afilado, con la condición de que la velocidad del aire debe ser finita en el borde de salida; y ésto determina a su vez el valor de la sustentación del perfil. Encontró sin embargo, que el valor de la resistencia resultaba nulo, como herencia de la paradoja de D'Alembert. (La hipótesis de Kutta no elimina la posibilidad de velocidades infinitas en bordes de ataque afilados; la depresión que se crea allí proporciona la tracción del borde de ataque que contribuye a anular la resistencia) Este resultado sorprendente da un valor infinito a la relación sustentación/resistencia, objetivo ideal de los ingenieros aeronáuticos.

La mecánica de fluidos cambió radicalmente cuando en 1904, hace ahora cien años, Ludwig Prandtl, que a los 29 años acababa de ser nombrado profesor y director del Instituto de Mecánica Aplicada de la Universidad de Göttingen, presentó en el Tercer Congreso Internacional de Matemáticas en Heidelberg, uno de los trabajos más trascendentales de la literatura científica. Está recogido en las actas del congreso, donde de modo muy sucinto, porque solo tuvo 12 minutos para su exposición, pero también muy claro, se sientan las bases de la mecánica de fluidos moderna y se explican muchos de los fenómenos que antes parecían misteriosos.

En muchos flujos en torno a cuerpos las fuerzas viscosas pueden despreciarse en la mayor parte del dominio fluido; pero, como observó Prandtl, no cerca de la pared ni en una estela aguas abajo. Fuera de estas regiones el fluido responde como no viscoso, o como nosotros decimos como ideal; el movimiento puede describirse mediante las

ecuaciones de Euler. Al movimiento de un fluido ideal no se le puede imponer la condición de no deslizamiento en la pared, por lo que el fluido de la corriente exterior debería deslizar respecto a la pared con una velocidad no nula. Sin embargo, ésta cae rápidamente a cero a través de la delgada capa límite, donde entran en juego los efectos de la viscosidad. La capa límite puede desprenderse ante gradientes de presión adversos, prolongándose en las capas de torbellinos de Helmholtz, que cambian radicalmente la estructura del flujo.

El desprendimiento de la capa límite sólo puede evitarse, o más bien retrasarse, utilizando cuerpos fuselados esbeltos y alas delgadas, y operando a ángulos de ataque pequeños. Para asegurar que el punto de desprendimiento esté cerca del borde de salida los bordes de salida deben ser afilados, como son los de los aviones.

La resistencia que en esas condiciones tienen los perfiles, o las alas de envergadura infinita, es muy pequeña. Sólo se debe a las fuerzas viscosas que actúan en la capa límite, tal como nos enseñó a calcular Prandtl. La sustentación es proporcional al ángulo de ataque hasta que, a veces bruscamente, el punto de desprendimiento se desplaza a las proximidades del borde de ataque y el ala entra en pérdida, dejando entonces de producir sustentación.

En las alas de envergadura finita, cuando la capa límite se desprende cerca del borde de salida, se genera en cada ala una capa de torbellinos, según descubrió el inglés Lanchester y calculó Prandtl, que conduce a un valor ya no nulo de la resistencia.

Si el ala está volando a un ángulo de ataque positivo se fuerza al aire a pasar por encima del ala con velocidades más altas (y menor presión) que en la corriente libre; y a pasar con velocidades menores (y mayor presión) por el intradós. Estas diferencias de velocidad corresponden a la circulación de la velocidad alrededor del perfil, y están ligadas a las depresiones en el extradós y a las sobrepresiones en el intradós que son responsables de la sustentación. Debido a esta diferencia de presiones habrá un movimiento, del aire que bordea las puntas del ala, desde el intradós hacia el extradós. El movimiento que adquiere el aire sobre el extradós del ala hacia el fuselaje y por debajo del intradós hacia las puntas, se traduce en la aparición de dos capas de torbellinos que emergen desde el borde de salida y se enrollan aguas

abajo para formar dos torbellinos contrarrotatorios en la estela de las alas, situados cerca de sus puntas. Tales torbellinos, que forman los núcleos de las estelas de condensación de los aviones, comunican al aire entre ellos un movimiento descendente, con una energía cinética que debe ser aportada por la potencia necesaria para vencer la resistencia. Esta resistencia ligada a la sustentación, se llama resistencia inducida; aunque disminuye al aumentar el alargamiento de las alas, sólo es nula cuando el alargamiento es infinito. Las capas de torbellinos de Helmholtz que emergen del borde de salida del ala, y que al enrollarse forman los torbellinos de Lanchester, invalidan la paradoja de D'Alembert: No podemos tener sustentación sin resistencia.

Fué Ludwig Prandtl, en la década de 1910, quien apoyándose en las ecuaciones de Euler y la condición de Kutta, consiguió sustituir la teoría cualitativa de Lanchester por una teoría cuantitativa con sólida base científica. Esta teoría permite relacionar la forma en planta del ala (y la curvatura y torsión de sus perfiles) con la distribución de cargas aerodinámicas y, en particular, con la sustentación y la resistencia. Además, con su teoría de la capa límite Prandtl mostró cómo calcular la resistencia de fricción, debida a los efectos viscosos, adicional a la inducida que aparece aunque el fluido sea ideal.

Con alas de gran envergadura, como las de algunas aves, y con perfiles delgados, para retrasar el desprendimiento de la capa límite, la relación  $L/D$  entre la sustentación y la resistencia, que alcanzó el valor de 10 con el Flyer de los hermanos Wright, tiene hoy valores próximos a 20 en los aviones comerciales y puede llegar a 40 o más en algunos planeadores. (Se ha diseñado un perfil con un valor máximo de 290 para la relación  $L/D$ ) La paradoja de D'Alembert se ha convertido en el teorema de D'Alembert para los ingenieros aeronáuticos.

El cálculo del flujo alrededor de los cuerpos aerodinámicos no es demasiado difícil, porque las perturbaciones introducidas en la corriente por fuselajes esbeltos y alas casi planas son pequeñas y, salvo en el régimen transónico, pueden describirse con la forma linealizada de las ecuaciones de Euler. No es muy difícil por tanto determinar las fuerzas aerodinámicas en función de la forma del ala y del fuselaje. Y también sabemos cómo describir la evolución de la capa límite, para calcular la resistencia y evitar el problema de



la entrada en pérdida. Por estos afortunados motivos, el análisis teórico y el cálculo se convirtieron en una ayuda preciosa para el diseño de los aviones.

Fué el matemático Félix Klein el responsable de la incorporación de Prandtl a la Universidad de Göttingen. Klein fué el gestor en Göttingen del desarrollo de las disciplinas científicas, usando sus buenas relaciones con Friedrich Althoff, durante muchos años director responsable de la enseñanza científica y técnica en el ministerio prusiano de Cultura, y también con magnates de la industria, como Krupp y Siemens.

Félix Klein visitó la Exposición Universal de Chicago en 1893, y allí tuvo ocasión de observar los avances tecnológicos espectaculares que se estaban produciendo. Es muy posible que, por ejemplo, pudiese ver en funcionamiento la turbina desarrollada por Laval; que estaba impulsada por vapor a través de una tobera convergente-divergente; por lo que el vapor podía alcanzar velocidades supersónicas antes de incidir sobre los álabes. Con la tobera de Laval se había incrementado notablemente el rendimiento de la turbina y ésta alcanzaba hasta 30.000 revoluciones por minuto.

A su vuelta, Klein se propuso impulsar en Göttingen los lazos entre las matemáticas y las otras disciplinas científicas y también introducir en la universidad la preocupación por los problemas tecnológicos. Con la cooperación de la industria, consiguió formar en Göttingen una asociación para el avance de la física aplicada y las matemáticas. Con su apoyo consiguió, en primer lugar, establecer una división técnica del Instituto de Física de la Universidad y, después, la dotación de dos cátedras para la División de Física Técnica: Una cátedra de Mecánica Aplicada y otra de Matemática Aplicada.

Para la de Mecánica Aplicada intentó atraer a un ingeniero húngaro, Aurel Stodola, Profesor muy prestigioso de Mecánica Aplicada en el Instituto Politécnico de Zurich. Acababa de publicar en 1903 un libro sobre turbinas, donde exponía los resultados de las primeras medidas de la distribución de presiones en toberas de Laval, convergentes-divergentes. Con estas medidas había demostrado que el vapor realmente alcanzaba velocidades supersónicas en la parte divergente de la tobera. Las medidas de presión mostraban, en algunos casos, la presencia de las ondas de choque predichas por

Riemann. Klein, en parte por razones de tipo económico, tuvo que abandonar la idea de contratar a Stodola. Se decidió entonces por ofrecer a Ludwig Prandtl la cátedra de Mecánica Aplicada, y a Carl Runge la de Matemática Aplicada; ambos eran profesores en la Escuela Técnica Superior de Hanover.

Esta selección resultaría providencial para convertir la Universidad de Göttingen en el gran centro de excelencia, no sólo para las ciencias matemáticas y físicas sino también para las de ingeniería.

Prandtl estudió Ingeniería Mecánica en la Escuela Superior Técnica de Munich y se doctoró en el año 1900 con una tesis sobre elasticidad. Pasó un año en una empresa de fabricación de maquinaria encargado de la tarea de hacer más eficiente el sistema de recogida, por succión, de las virutas que producían los tornos. Al no existir métodos apropiados para predecir el funcionamiento del sistema de succión llevó a cabo algunos experimentos propios que le ayudaron en el diseño de un nuevo sistema que redujo a la tercera parte los costes de recolección de las virutas.

En 1901 fué contratado como profesor en la Escuela Superior Técnica de Hanover, y fué madurando sus ideas sobre la capa límite. Estas ideas surgieron al tratar de entender la dificultad de predecir la corriente en conductos de sección variable. En estos, la corriente no se abre para seguir llenando la sección cuando su área aumenta bruscamente, sino que se desprende y genera un chorro, como en el flujo a la salida de orificios analizado por Helmholtz.

Cuando aceptó el puesto de profesor en Göttingen en 1904, ya había conseguido, describir la estructura asintótica de los flujos laminares a altos números de Reynolds, que representan una gran mayoría de los flujos de interés práctico. Prandtl observó que, si bien los efectos viscosos y de conducción de calor pueden despreciarse en la mayor parte del campo fluido, ambos juegan un papel esencial en la capa límite adyacente a las superficies sólidas que limitan el fluido, debido a los fuertes gradientes de velocidad y de temperatura que se establecen en dirección transversal a esta capa, que determinarán las fuerzas de fricción y el intercambio de calor entre el sólido y el fluido.

Además de los aspectos esenciales de su teoría; incluye también una breve nota para explicar que las ecuaciones no lineales que descri-

ben la capa límite en el flujo paralelo a una placa plana tienen solución de semejanza, por lo que el problema se reduce a resolver una ecuación diferencial ordinaria, no lineal, cuya solución calculó aproximadamente, con el método de Runge, para predecir por primera vez la resistencia de fricción sobre la placa.

Con la introducción de la teoría de la capa límite, Prandtl estableció también el modelo a seguir para la solución de problemas de perturbaciones singulares asociados a la existencia de escalas muy dispares. A partir de 1955, como consecuencia de las aportaciones y el esfuerzo sistematizador de Kaplun y Lagerstrom, Cole y Kevorkian y Van Dyke, estos métodos asintóticos basados, en desarrollos asintóticos acoplados, junto con los métodos de escalas múltiples para el análisis de procesos oscilatorios, pasaron a ser una herramienta imprescindible para el análisis de los flujos que presentan disparidad en sus escalas.

En sus primeros años en Göttingen, desde 1905 a 1908, Prandtl se ocupó, del análisis del flujo en toberas de Laval, con la colaboración de Meyer, un estudiante de doctorado. Para ello construyó un pequeño túnel supersónico con una tobera convergente divergente cuya sección mínima era rectangular de aproximadamente medio centímetro de lado. Se alimentaba esta tobera desde un depósito presurizado, y descargaba a la atmósfera. Usó paredes laterales de cuarzo para permitir la visualización con el sistema de estrioscopia que había utilizado Ernest Mach, 15 años antes, para obtener la primera fotografía del sistema de ondas de choque que acompaña a un proyectil en vuelo supersónico. En la figura que se adjunta aparecen reproducidas algunas de las fotografías obtenidas por Prandtl y Meyer al visualizar el flujo, subsónico en la parte convergente de la tobera y supersónico en la parte divergente, para distintos valores de la presión en el depósito.

En estas fotografías se observan claramente las ondas de presión, que llamamos de Mach, correspondientes a las superficies características de las ecuaciones de Euler, introducidas por Riemann en 1858. El ángulo (de Mach) que las características forman con la corriente es indicativo del valor local del número de Mach; relación entre la velocidad local del fluido y la del sonido.

Fuera ya de la tobera, la estructura del flujo depende del valor de

la relación entre la presión del depósito y la presión exterior, que en estos experimentos es la presión atmosférica. La presión en la sección de salida es mayor que la atmosférica cuando la presión del depósito es superior a 6 atmósferas. En este caso el chorro de salida se ensancha mediante un abanico de ondas de expansión, que arrancan del borde de salida de la tobera, y los límites del chorro son capas de tornellinos de Helmholtz.

Por el contrario, para valores de la presión en el depósito menores que 6 atmósferas, la presión en la sección de salida es menor que la atmosférica, y se produce una contracción del chorro a la salida, mediante ondas de choque oblicuas que arrancan de los bordes de la tobera. Cuando estas ondas de choque alcanzan los límites del chorro se reflejan en forma de un abanico de expansión.

Para explicar estos fenómenos, Prandtl y Meyer extendieron la teoría de las ondas de choque normales, de Rankine (1870) y Hugoniot (1887), para ondas de choque oblicuas. También fueron capaces de encontrar una solución exacta de las ecuaciones no lineales de Euler, que describe el flujo supersónico observado en los abanicos de expansión.

Prandtl estaba dedicado a estas investigaciones, sobre un flujo que es típico de las toberas de los cohetes usados en la propulsión espacial, mientras los hermanos Wright estaban haciendo nacer la aviación con velocidades de vuelo pequeñas frente a la del sonido.

Prandtl contribuyó también al progreso de la aeronáutica con el diseño y montaje, en 1908, de un túnel aerodinámico de circuito cerrado, con una sección de ensayos cuadrada de 2 metros de lado, incorporando alabes guía en los codos con el fin de minimizar las pérdidas de presión y uniformizar la corriente. Este túnel de Göttingen fué el modelo en que se inspiraron muchos de los túneles posteriores, entre ellos los montados por Karman, primero en Aachen en 1913 y después en Pasadena en 1928. También es de este tipo el que en 1921 montó Emilio Herrera en Cuatro Vientos. En él se ensayaron muchos de nuestros primeros aviones y también modelos del autogiro de La Cierva.

Así pues, debemos homenajear este año no sólo a los hermanos Wilbur y Orville Wright, que nos enseñaron a hacer ingeniería aeronáutica, sino también a Ludwig Prandtl, que hace 50 años, nos dejó la herencia de su luz sobre la mecánica de fluidos.

Teodoro von Karman nació en 1880 en Budapest, donde estudió Ingeniería Mecánica antes de trasladarse a Göttingen para hacer el doctorado en el Instituto de Prandtl. Allí permaneció hasta 1913 repartiendo su actividad, al igual que Prandtl, entre la mecánica de sólidos y la de fluidos.

En ese período concluyó, entre otros, dos trabajos de gran impacto científico: Uno, con Max Born, dedicado a la teoría de los calores específicos de los sólidos. El otro, que fué presentado en el Quinto Congreso Internacional de Matemáticas, representa su primera gran aportación a la mecánica de fluidos. Es un estudio de la estabilidad de la calle de torbellinos que se organiza en la estela de los cuerpos cilíndricos cuando el número de Reynolds supera un valor crítico del orden de 40. Los torbellinos se desprenden alternativamente del cilindro con una frecuencia característica de los tonos eólicos, proporcional al cociente entre la velocidad y el diámetro del cilindro. Karman consideró la estabilidad de distintas disposiciones regulares de los torbellinos, resultando inestables todas salvo una, que era marginalmente estable. En ésta los torbellinos, que suponía puntuales, se situaban alternativamente, al tresbolillo, en dos líneas paralelas con un valor preciso del cociente entre la distancia y la separación. La calle de torbellinos de Karman está ligada a las fuerzas aerodinámicas oscilatorias que aparecen sobre el cilindro, por lo que tienen mucha importancia en la estabilidad estructural de los cuerpos.

Karman dirigió desde 1913 hasta 1933 un Instituto de Aerodinámica en Aachen donde siguió haciendo contribuciones notables a la aerodinámica, que incluyen la ley logarítmica de distribución de velocidades cerca de la pared en el flujo turbulento en conductos y capas límites.

Cuando en 1928 fué nombrado director del Guggenheim Aeronautical Laboratory del Instituto Tecnológico de California, éste no tardó en convertirse en el centro de excelencia de las ciencias aeronáuticas en Estados Unidos. En el túnel aerodinámico que él contribuyó a diseñar ensayaron sus aviones todas las industrias aeronáuticas americanas.

Karman se ocupó del desarrollo de la propulsión mediante motores cohete, siendo el creador, durante la segunda guerra mundial, del Jet Propulsion Laboratory y de la compañía Aerojet, dedicadas a la propulsión.

Sus aportaciones científicas no disminuyeron en América. Entre ellas destaca especialmente su teoría de los movimientos transónicos

alrededor de cuerpos esbeltos y perfiles delgados, desarrollada cuando, a mediados del siglo XX, nace el vuelo transónico. Para velocidades próximas a la del sonido aparecen efectos no lineales que invalidan la teoría desarrollada para el vuelo subsónico y supersónico, por Prandtl y Glauert en los años 1920.

En 1951 Karman impartió en la Sorbona, con la colaboración de Gregorio Millán, un curso sobre Aerotermoquímica, publicado en 1958 en forma ampliada y actualizada por Millán en su *Aerothermochemistry*. En este curso aparecen por primera vez las ecuaciones de la mecánica de fluidos en su forma generalizada para el análisis de los movimientos de fluidos con reacciones químicas.

De esta aportación de Karman a la mecánica de fluidos nació el grupo español en combustión, y con él la dedicación a este campo de quien escribe esto.

Otra contribución pionera a la mecánica de fluidos, con un importantísimo impacto tecnológico, se debe a Reynolds, que en 1886 estableció las bases de la teoría de la lubricación. La lubricación de cojinetes fué analizada por Sommerfeld, que presentó sus resultados al Tercer Congreso Internacional de Matemáticas, en 1904.

En el Cuarto Congreso Internacional de Matemáticas en 1908, Sommerfeld presentó las ecuaciones de Orr-Sommerfeld de la estabilidad de flujos paralelos incluyendo los efectos viscosos. Fué Heisenberg el primero en obtener, en su tesis doctoral de 1924, una estimación del número de Reynolds crítico para el que el flujo laminar de Poiseuille bidimensional pierde estabilidad. Esta estimación está basada en la solución asintótica, para valores grandes del número de Reynolds, de las ecuaciones de Orr-Sommerfeld.

En 1921, G.I. Taylor, que es sin duda el más importante de los investigadores ingleses en mecánica de fluidos, publicó en los *Proceedings* de la Royal Society un trabajo seminal sobre la inestabilidad del flujo de Couette entre cilindros concéntricos. Taylor dedicó los primeros años de su actividad investigadora a la meteorología e hizo en los años 1930, los trabajos que sirvieron de fundamento para la teoría estadística de la turbulencia isotrópica (a la que el matemático ruso Kolmogorov contribuiría con su teoría fundamental de la cascada). Taylor hizo durante la primera guerra mundial las primeras

medidas en vuelo de la distribución de presiones sobre un ala; actuando simultáneamente como piloto e ingeniero de vuelo.

Otro insigne investigador inglés fué James Lighthill, quien, entre otras muchas aportaciones, contribuyó con el desarrollo de la teoría de la generación del ruido en flujos turbulentos. También han sido pioneras sus contribuciones a la biofluidodinámica. Murió en 1998 cuando, a sus 74 años, llevaba ya nueve horas nadando alrededor de la isla Sark, en el canal de la Mancha, que había sido el primero en rodear. Sir James Lighthill había ocupado la cátedra Lucasiana en Cambridge.